1960—2020年黄河流域气候生长季时空演变及成因分析

张志高[1]，　孙梓欣[2]，　张秀丽[3]，　郭可欣[4]，　李卓娅[1]，　郝海姣[1]，　蔡茂堂[5]

（1. 安阳师范学院资源环境与旅游学院，河南　安阳　455000；2. 河南大学地理与环境学院，河南　开封　475004；3. 河南大学黄河文明与可持续发展研究中心，河南　开封　475001；4. 西南石油大学地球科学与技术学院，四川　成都　610500；5. 中国地质科学院地质力学研究所，北京　100081）

摘　要：基于1960—2020年黄河流域89个气象站点资料，采用Mann-Kendall突变检验、Morlet小波分析和相关分析等方法对黄河流域生长季始期（GSS）、生长季末期（GSE）、生长季长度（GSL）、生长季内≥10 ℃活动积温（AT10）和≥10 ℃活动积温天数（DT10）的时空变化特征及其影响因素进行了分析。结果表明：（1）1960—2020年黄河流域GSS显著提前[$-2.04\ d\cdot(10a)^{-1}$]，GSE呈推迟趋势[$0.85\ d\cdot(10a)^{-1}$]，GSL显著延长[$2.88\ d\cdot(10a)^{-1}$]，但区域差异较大，下游GSS开始最早（2月23），上游最晚（3月30），上游GSE结束最早（10月24），下游最晚（11月30），下游GSL最长为334.03 d，上游最短为297.33 d。（2）近61 a黄河流域GSL的显著延长主要源于GSS的显著提前。（3）近61 a来黄河流域生长季指标存在28 a左右的周期变化，GSS、AT10和DT10于1998年发生突变，GSL于2002年发生突变。（4）黄河流域上、中、下游地区生长季指标变化趋势一致，下游地区变化幅度最大，上游地区次之，中游地区变幅最小。（5）相关分析表明，近61 a来黄河流域GSS提前主要与春季升温有关，GSE延迟主要源于秋季增温，上游和下游地区GSL延长主要源于春季增温，中游地区GSL延长主要与秋季变暖有关。

关键词：生长季；时空演变；变化趋势；季节温度；黄河流域

IPCC第六次评估报告指出，全球地表温度正以前所未有的速度上升，2011—2020年全球平均表面温度相比1850—1900年上升1.09 ℃，2001—2020年较工业化前增暖0.99 ℃[1]，北半球中高纬度地区气温上升更为明显[2]。随着全球变暖的持续发展，气温、光照、降水等气候要素也相应发生变化，进而对作物生长发育以及农业生态环境产生显著影响[3-4]。生长季是温度和土壤湿度条件适宜作物生长的时期，对生态系统功能发挥有重要控制因素[5]。在全球气候变暖背景下，生长季变化会显著影响生态系统及农业作物生产[6-7]。因此，生长季时空演变格局及其影响因素受到了国内外学者的广泛关注[8-11]。众多学者分别以物候观测[11-12]、归一化植被指数（NDVI）[13]和地表气温[14]等方面资料进行生长季相关研究。物候观测和NDVI数据序列相对较短，而气象站点气温数据空间覆盖范围广、持续时间长，可用于长时间尺度上气候生长季研究[15]。相关研究表明，在全球变暖背景下北半球大部分地区生长季呈延长趋势[16-18]。中国大部分地区如内蒙古[19]、华北地区[20]、青藏高原[21]和东北地区[22]等生长季开始日提前、结束日推迟、长度延长，但区域性特征明显，青藏高原地区生长季增加最多，北方地区次之，南方地区最少[23]。在生长季变化影响因素方面，Xia等[24]发现，多年代际气候变化（multidecadal climate variability, MDV）与大西洋多年代际振荡指数贡献了1980—2009年北半球生长季延长的53%；Dong等[21]认为，1960—2009年青藏高原生长季指数变化与海拔高度密切相关；吴蓓蕾等[25]研究发现，中国平均

收稿日期：2023-01-30；　**修订日期：**2023-05-24

基金项目：国家自然科学基金项目（42272112）；河南省哲学社会科学规划项目（2022BJJ003）；河南省科技攻关项目（232102320024，232102321109）；河南省高等学校青年骨干教师项目（2020GGJS188）；河南省高等学校重点科研项目（23A170008）；安阳市科技计划项目（2022C01NY019, 2021C01NY035）资助

作者简介：张志高（1986-），男，博士，副教授，主要从事气候变化研究. E-mail: Zhangzhg06@163.com

通讯作者：蔡茂堂. E-mail: Caimaotang@126.com

生长季开始日提前和长度延长主要源于春季升温，生长季结束日推迟则与秋季变暖有关；Jiang等[26]研究表明，新疆地区生长季延长主要源于结束日的推迟；Wu等[27]揭示了风速变化对秋季物候的影响，发现风速减弱延迟了高纬度植被秋季落叶期；还有学者分析了生长季气候资源的变化[28]。

黄河流域横跨我国北方东、中、西三大地理阶梯，跨越干旱、半干旱和半湿润区，流域上、中、下游地形地貌、植被及气候类型分异显著，为我国重要的生态功能区。黄河流域现有耕地1.3×10^7 hm^2，粮食产量约占全国1/3，在我国农业生产中占有重要地位。因此，本文基于1960—2020年逐日气温数据资料，运用线性趋势估计、Mann-Kendall突变检验和相关分析等方法对近61 a来黄河流域气候生长季指标的时空演变进行研究，并探讨其影响因素，以期为准确把握气候变化对流域生态环境的影响、充分利用气候资源以及保障粮食安全等方面提供科学依据和参考。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究区概况

黄河流域(32°6′~41°48′N，95°50′~119°6′E)横贯青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和华北平原4个地貌单元，包含青海、四川等9省区，流域面积约7.52×10^5 km^2。黄河流域海拔在0~6241 m，西接青藏高原，中部为黄土高原区，东邻华北平原，东西跨度约5464 km，整体地势西高东低，起伏显著。流域位于中纬度地带，受大气环流和季风环流的影响，跨越干旱、半干旱、半湿润气候区。流域多数地区降水在200~650 mm，且年内分布不均，多集中在6—10月，年均温在−4~14 ℃，全年日照时数在2000~3300 h。为了研究黄河流域生长季指标的区域分布特征，将黄河流域进一步划分为上、中、下游地区，其中，上游地区包括久治、景泰和包头等40个气象站点，中游地区包括武功、靖边和神木等42个气象站点，下游地区包括新乡、郑州和沂源等7个气象站点。

1.2 数据来源

1960—2020年黄河流域89个气象站点逐日气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(http://data.cma.cn)中国地面气候资料日值数据集，该数据集经过极值检验和RHtest均一性检验等方面的严格质量控制。研究区域及代表站点分布如图1所示。

1.3 生长季指标计算

生长季的界定尚未统一，参考相关资料，本文将生长季长度(GSL)定义为一年中5 d滑动平均温度大于5 ℃到最后一次连续5 d滑动平均温度大于5 ℃之间的天数[29]。生长季开始(GSS)为一年中第一次连续5 d滑动平均气温大于5 ℃的第一天，生长季结束(GSE)为最后一次连续5 d滑动平均气温大于5 ℃的最后一天。生长季内≥10 ℃活动积温(AT10)为生长季内≥10 ℃日平均气温的累积之和，对应的天数之和为生长季内≥10 ℃活动积温天数(DT10)。GSS、GSE、GSL和DT10单位为d，AT10单位为℃。

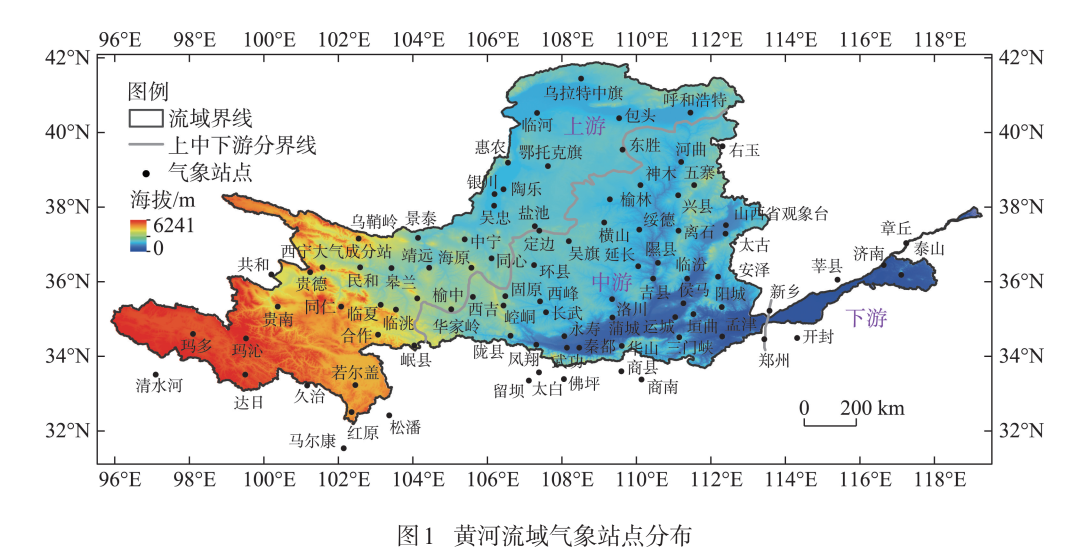


图1 黄河流域气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorology stations in the Yellow River Basin

1.4 研究方法

采用Mann-Kendall方法[30]对1960—2020年黄河流域气候生长季指标（GSS、GSE、GSL、AT10和DT10）的突变特征进行分析，利用信噪比对其突变点进行检验[31]。运用Morlet小波分析法[32]分析黄河流域生长季指标的周期变化特征。

2 结果与分析

2.1 气候生长季时间变化

由图2可知，1960—2020年黄河流域GSS在63.36~88.43 d，平均为75.90 d（3月17日），2022年最小，1976年最大。近61 a来GSE平均值为310.25 d（11月6日），在301.10~318.06 d之间波动，1981年最小，2016年最大。近61 a GSL平均值为235.35 d，其中1976年最小为219.74 d，2020年最大为250.84 d。1960—2020年AT10在2925.51~3592.65 ℃，平均值为3265.91 ℃，1976年最小，2016年最大。近61 a来DT10平均为187.54 d，1976年最小为172.92 d，2009年最大为206.73 d。从变化趋势来看，近61 a来GSS呈显著的提前趋势（$P<0.01$），倾向率为-2.04 d·(10a)$^{-1}$，GSE以0.85 d·(10a)$^{-1}$的倾向率呈明显的推迟趋势（$P<0.05$），GSL则呈显著的延长趋势（$P<0.01$），倾向率为2.88 d·(10a)$^{-1}$。AT10和DT10均呈显著增加趋势，且通过了0.01的显著性检验，倾向率分别为70.62 ℃·(10a)$^{-1}$和3.26 d·(10a)$^{-1}$。

年代际变化方面（表1），1960—1980年代GSS偏大，距平为正，生长季开始较晚，GSE距平为负，生长季结束较早，GSL距平为负，生长季长度相对较短，AT10距平为负，相对较小。1990年代后GSS逐年代提前，距平转为负值，GSE距平转正，生长季末期推迟，GSL距平转为正值，生长季长度延长，AT10距平转正，生长季内≥10 ℃活动积温增加。1970年代DT10最小，2000年代和2010年代DT10最大，生长季内≥10 ℃活动积温天数最多。

2.2 上、中、下游地区生长季指标时间变化

由表2可知，近61 a来流域上、中、下游地区

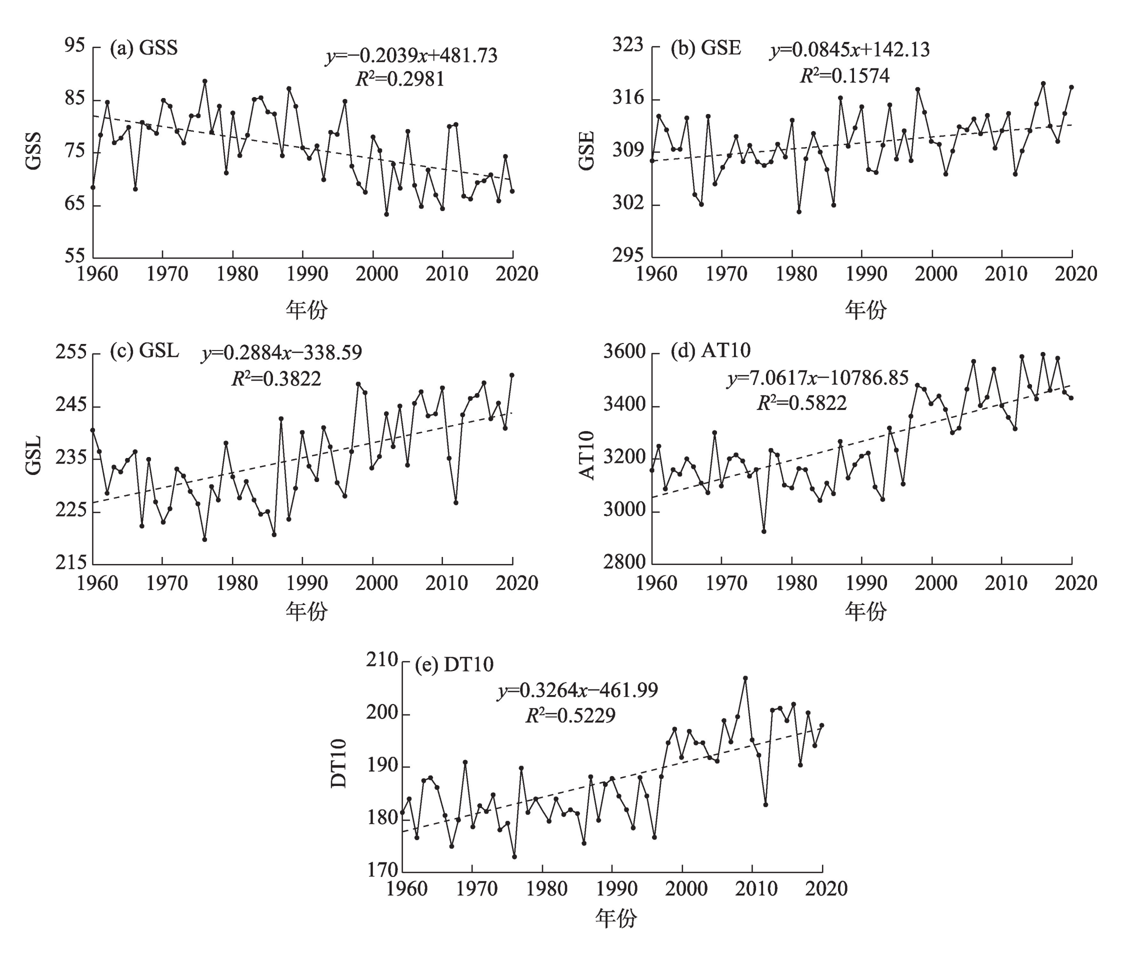


图2 1960—2020年黄河流域生长季指标变化

Fig. 2 Changes of growing season indicators in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

表1 黄河流域生长季指标年代际变化

Tab. 1 Interdecadal variation of growing season index in the Yellow River Basin

年代	GSS		GSE		GSL		AT10		DT10	
	均值	距平	均值	距平	均值	距平	均值	距平	均值	距平
1961—1970	79	3	309	−1	231	−4	3157	−109	183	−5
1971—1980	81	5	309	−1	229	−6	3146	−120	182	−6
1981—1990	81	5	309	−1	229	−6	3141	−125	183	−5
1991—2000	75	−1	311	1	237	2	3272	6	187	−1
2001—2010	70	−6	311	1	242	7	3424	158	196	8
2011—2020	71	−5	313	3	243	8	3467	201	196	8

表2 1960—2020年黄河流域生长季指标变化

Tab. 2 Changes of growing season index in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

地区	GSS		GSE		GSL		AT10		DT10	
	均值	倾向率/[d·(10a)$^{-1}$]	均值	倾向率/[d·(10a)$^{-1}$]	均值	倾向率/[d·(10a)$^{-1}$]	均值	倾向率/[℃·(10a)$^{-1}$]	均值	倾向率/[d·(10a)$^{-1}$]
上游	88.81	−2.00	297.33	1.02	208.02	3.02	2472.16	73.33	156.31	3.69
中游	66.73	−1.96	318.03	0.60	252.30	2.57	3732.24	66.10	207.89	2.90
下游	53.63	−2.70	334.03	1.48	281.40	4.18	4619.85	82.95	232.88	3.15

GSS分别为88.81 d、66.73 d和53.63 d，上游地区生长季开始最晚（3月30），下游地区开始最早（2月23），相差35 d；下游地区GSE为334.03 d，上游为297.33 d，相差36.70 d，上游地区生长季结束最早（10月24），下游地区结束最晚（11月30），相差37 d；下游地区GSL为281.40 d，上游地区为208.02 d，上下游地区生长季长度相差73.38 d；下游地区AT10为4619.85 ℃，上游地区为2472.16 ℃，相差2147.69 ℃；DT10在下游地区最大为232.88 d，上游地区最小为156.31 d，相差76.57 d。从变化趋势来看，黄河流域上、中、下游地区各指标变化趋势一致，从变化幅度来看，下游地区GSS、GSE、GSL和AT10指标变化幅度最大，上游地区次之，中游地区变幅最小，上游地区DT10变化幅度最大，下游次之，中游地区最小。

2.3 气候生长季空间分布特征

由图3可知，黄河流域GSS的变化范围为37~164 d，近61 a平均值为75.90 d，即3月17日，整体呈由东到西、由南向北逐渐推迟趋势，流域东南部生长季开始最早，日序在37~64 d，即2月6日—3月5日，流域西南部达日、玛多和清水河等站生长季开始最晚，日序在129~164 d，即5月9日—6月14日。黄河流域GSE在255~346 d，平均为310.25 d，即11月6日，分布趋势与始期相反，整体呈由东到西、由南向北逐渐提前的趋势，流域东南部生长季结束最晚，日序在327~346 d，即11月23日—12月12日，流域西南部玛沁、达日、玛多和清水河等站生长季结束最早，日序在255~273 d，即9月12日—9月30日。黄河流域GSL在92~310 d，平均为235.35 d，整体呈由东到西，由南向北逐渐缩短趋势，流域东南部GSL最长，在265 d以上，西南部玛多和清水河生长季最短，在105 d以下。黄河流域AT10在33~5153 ℃，流域东南部积温最高，在4142 ℃以上，西南部玛多和清水河最低，在188.42 ℃以下。DT10在3~251 d，流域东南部积温天数最多，在203 d以上，西南部玛多和清水河最低，在20 d以下，在空间分布上与AT10的空间分布大致相似，即积温天数越多，积温越高，天数越少，积温越低。

2.4 气候生长季变化趋势空间分布特征

1960—2020年黄河流域生长季指标变化趋势空间分布如图4和表3所示，由图4可知，近61 a来黄河流域GSS整体呈提前趋势，全部89个气象站点倾向率＜0，倾向率在−4.1~−0.2 d·(10a)$^{-1}$之间，其中有71.9%站点通过了0.05显著性检验（表3），在空间分布上呈一定的区域集聚特征，流域东南部河南、山东地区与流域中部内蒙古西部、宁夏地区提前幅度较大，西部青海地区提前幅度较小，在−1.6 d·(10a)$^{-1}$以内。GSE整体上呈延迟趋势，倾向率在−0.6~2.6

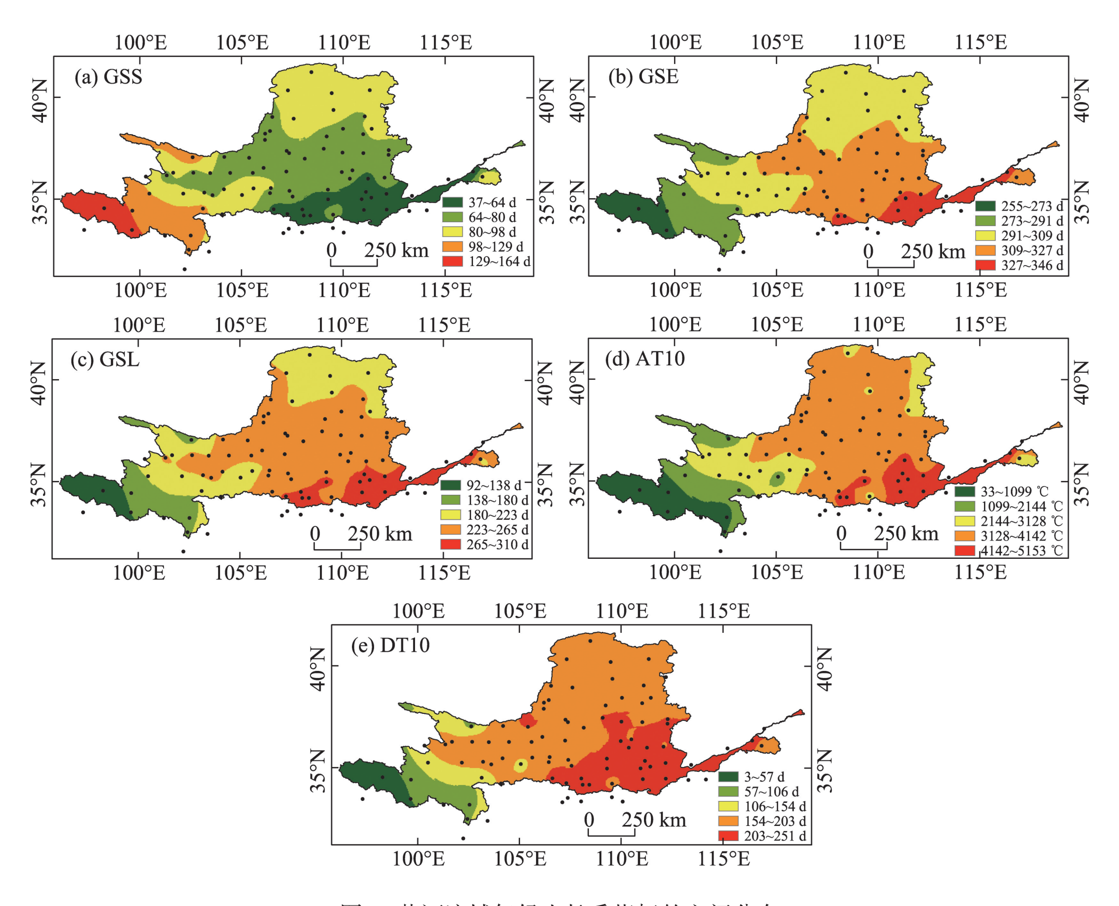


图3　黄河流域气候生长季指标的空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of climate growing season index in the Yellow River Basin

d·(10a)$^{-1}$之间,在89个气象站点中,有82个站点呈递增趋势,且80.9%的站点达到了0.05显著性水平,流域中西部地区和东南部山东、河南地区推迟幅度较大,中东部山西地区推迟幅度较小。GSL整体呈现出延长趋势,在0~5.5 d·(10a)$^{-1}$之间,有88个站点呈延长趋势,其中,80.9%的站点呈显著延长趋势,流域东南部河南、山东地区和中西部内蒙古西部、宁夏地区形成两个高值中心,倾向率在3.3 d·(10a)$^{-1}$以上,流域中东部山西地区倾向率较小,在2.4 d·(10a)$^{-1}$以下。AT10整体呈现出上升趋势,倾向率在2.4~148.6 ℃·(10a)$^{-1}$,全部89个站点呈上升趋势,其中,93.3% 站点通过了0.05显著性检验,流域中西部内蒙古西部、宁夏地区增幅较大,在88.4 ℃·(10a)$^{-1}$以上,流域南部陕西地区、流域西部青海、四川地区增幅较小。DT10整体呈上升趋势,倾向率在−0.2~7.2 d·(10a)$^{-1}$之间,88个站点呈上升趋势,其中,79.8%的站点通过了0.05显著性检验,流域南部陕西地区增幅较小,在2.6 d·(10a)$^{-1}$以下,流域西南部四川地区增幅较大,在4.3 d·(10a)$^{-1}$以上。

2.5　气候生长季突变特征

由图5可知,近61 a来黄河流域GSS正序列*UF*曲线呈波动下降趋势,反序列*UB*曲线呈上升趋势,二者相交于1998年,突变点在信度线内,且通过了信噪比检验,确定其突变点为1998年,突变前生长季日序平均为79.19 d(3月20日),突变后为70.45 d(3月11日),提前了9 d(图5a)。GSE的*UF*曲线在1994年后在0值之上,表明该时期*UF*曲线上升趋势明显,*UB*曲线呈波动下降趋势,*UF*和*UB*曲线存在多个交点,但均未通过信噪比检验,故GSE不存在突变点(图5b)。GSL的正序列*UF*和反序列*UB*曲线相交于2002年,在信度线以内,且通过了信噪比检验,其突变点为2002年,突变后GSL平均为242.98 d,较突变前的231.90 d显著延长了11.08 d(图5c)。AT10和DT10的正序列*UF*和反序列*UB*曲线均相交于1998年,均在信度线内,且通过了信噪比检验,故AT10和DT10的突变点为1998年,突变后AT10和DT10分别较突变前增加了288.92 ℃和13.49 d。

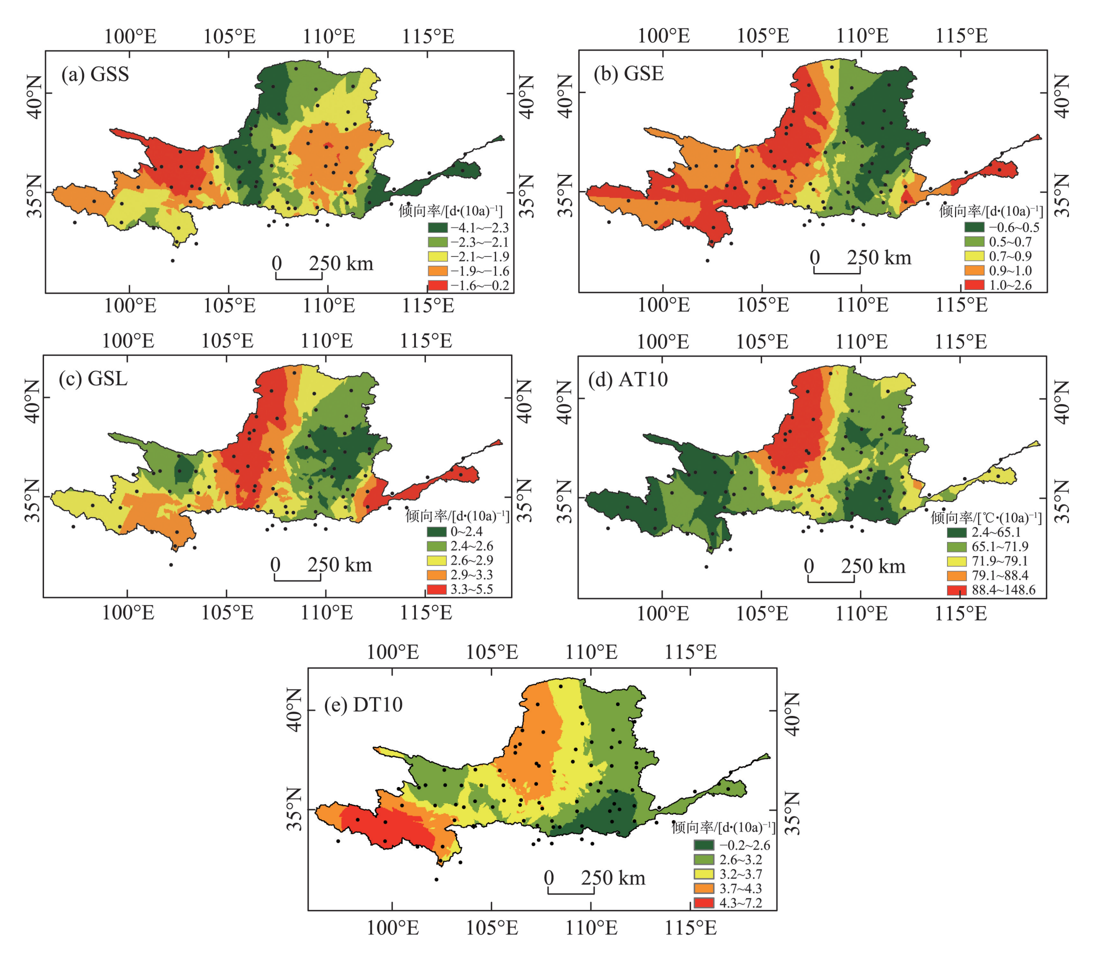


图4　黄河流域生长季指标变化趋势的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of growing season index trends in the Yellow River Basin

表3　黄河流域生长季指标空间趋势检验

Tab. 3　Spatial trend test of growing season index in the Yellow River Basin

生长季指标	趋势检验通过率/%	趋势增加个数	显著增加个数	趋势减少个数	显著减少个数
GSS	71.9	0	0	89	65
GSE	80.9	82	71	7	1
GSL	80.9	88	72	1	0
AT10	93.3	89	83	0	0
DT10	79.8	88	71	1	0

注：显著水平为α=0.05。

2.6　生长季周期变化特征

1960—2020年黄河流域生长季指标Morlet小波分析结果如表4所示（图略），由表4可知，GSS存在28 a、19 a与13 a左右的周期变化，其中，28 a左右的周期为第一主周期，19 a左右周期为第二主周期，13 a左右周期为第三主周期。近61 a来黄河流域GSE、GSL、AT10和DT10均存在28 a左右的主周期变化，而其他周期不明显。

2.7　生长季与温度变化的关系趋势分析

由表5可知，黄河流域上游地区生长季指标与温度变化相关性最强，中游次之，下游最弱。黄河流域平均GSS与温度变化显著负相关，均通过了0.01的显著性检验，与春季平均温度负相关性最强，相关系数为−0.65，说明GSS提前与春季变暖有关。分流域来看，黄河流域上、中、下游地区均与温度变化呈负相关关系，其中，与春季温度负相关性最强，相关系数分别为−0.83、−0.55和−0.34，相关性依次减弱。黄河流域平均GSE与秋季平均温度相关性最强，说明GSE延迟与秋季变暖有关，上、中、下游地区GSE均与秋季温度相关性最强，相关系数分别

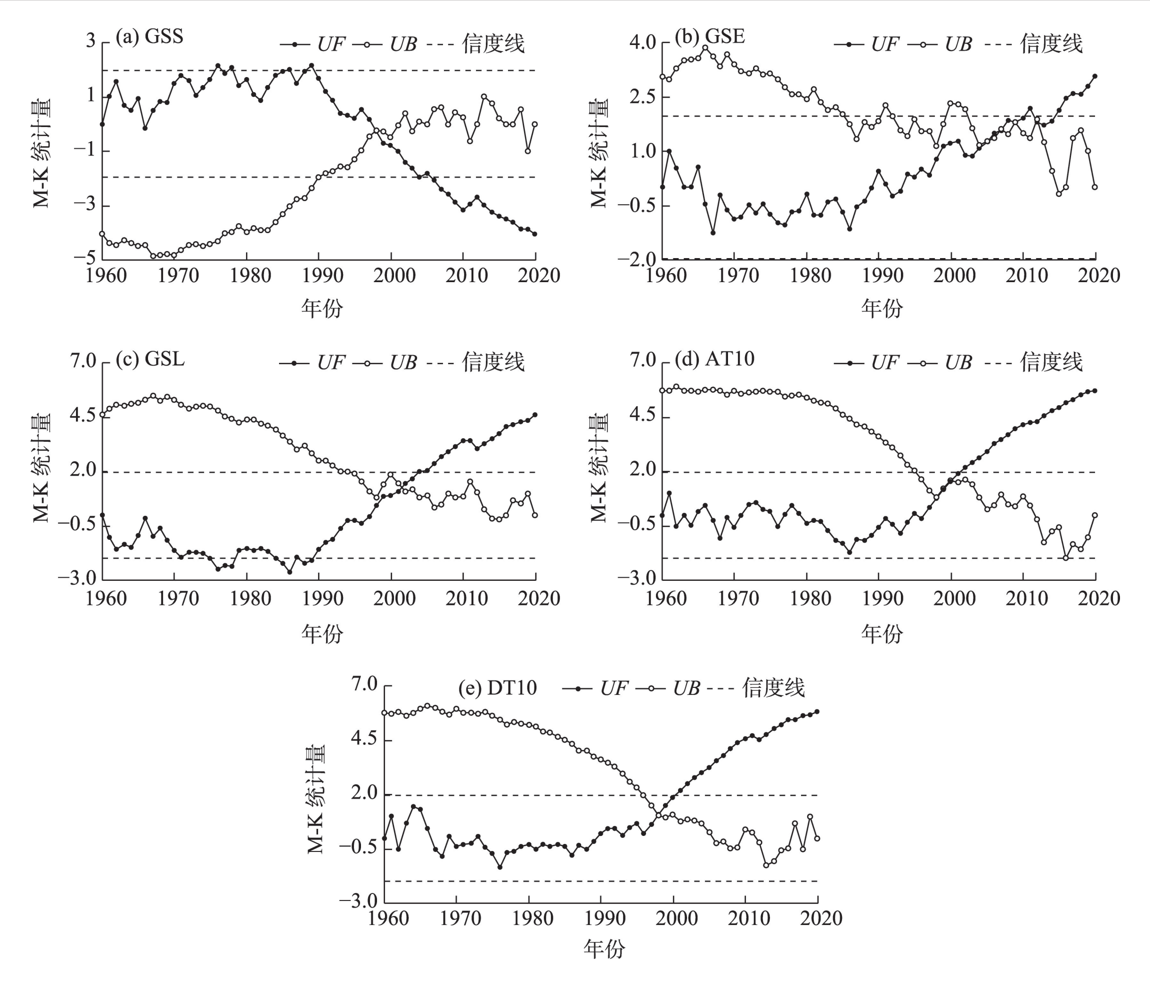


图5 黄河流域地区生长季指标时间序列的Mann-Kendall检验

Fig. 5 Mann-Kendall test curve of the time series of growing season index in the Yellow River Basin

表4 1960—2020年黄河流域生长季指标周期变化特征

Tab. 4 Characteristics of periodic changes of index in the Yellow River Basin during the growing season from 1960 to 2020

生长季指标	第一周期/a	第二周期/a	第三周期/a
GSS	28	19	13
GSE	28	–	–
GSL	28	–	–
AT10	28	–	–
DT10	28	–	–

为0.82、0.66和0.42。黄河流域平均GSL与秋季平均温度相关性最强,说明GSL延长与秋季变暖有关,上游地区与春季温度相关性最强,相关系数达0.80,中游地区GSL延长主要与秋季增温有关,相关系数为0.62,下游地区主要与春季增温有关,相关系数为0.41。

3 讨论

1960—2020年黄河流域GSS呈提前趋势,GSE

表5 黄河流域生长季指标与各季节平均温度的相关关系

Tab. 5 Correlation between growing season index and seasonal average temperature in the Yellow River Basin

地区	GSS				GSE				GSL			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
黄河流域	−0.65**	−0.54**	−0.44**	−0.40**	0.29*	0.22	0.75**	0.51**	0.66**	0.53**	0.69**	0.55**
上游	−0.83**	−0.63**	−0.43**	−0.38**	0.31*	0.40**	0.82**	0.52**	0.80**	0.69**	0.73**	0.55**
中游	−0.55**	−0.43**	−0.38**	−0.27*	0.18	0.02	0.66**	0.36**	0.52**	0.35**	0.62**	0.39**
下游	−0.34**	−0.13	−0.19	−0.31	0.26*	0.03	0.42**	0.32*	0.41**	0.12	0.37**	0.28*

注:**表示在0.01水平上显著相关,*表示在0.05水平上显著相关。

呈推迟趋势,GSL呈延长趋势,这与全国生长季变化趋势一致[25]。从变化幅度来看,黄河流域GSS、GSE和GSL变化趋势分别为-2.04 d·(10a)$^{-1}$、0.85 d·(10a)$^{-1}$和2.88 d·(10a)$^{-1}$,黄河流域GSS提前幅度明显大于全国平均水平及其他多数地区,小于华北地区[20],而GSE延迟幅度要小于全国平均水平,GSL延长幅度大于全国及其他大部分区域,小于华北[20]和青藏高原地区[21],这可能与黄河流域1960—2020年增温趋势0.36 ℃·(10a)$^{-1}$显著高于全国增温速率0.25 ℃·(10a)$^{-1}$[33]有关。近61 a来黄河流域GSS提前了12.4 d,GSE推迟了5.2 d,GSL延长了17.6 d,GSS贡献了生长季延长的70.5%,GSE贡献了29.5%,GSS的提前对生长季延长的影响更为重要。

黄河流域GSS提前主要与春季增温有关,GSE延迟主要与秋季增温有关,这与吴蓓蕾等[25]对全国生长季的研究结果一致,黄河流域GSL的延长主要与秋季增温有关,这与全国平均GSL延长主要源于春季升温的结论不同,这可能与各区域气温变化不同有关。

在突变特征方面,黄河流域生长季指标分别于1998年和2002年发生突变,这与华北地区[20]研究结果一致,研究表明,全球气候状态转变发生于20世纪80年代中后期[34],气候状态的转变导致气候变率增大及极端气候事件增加,导致生长季始期提前,生长季末期延迟和生长季延长。

本文利用黄河流域89个气象站点气温数据来研究生长季指标变化,还不能较好地反应区域内植被生长动态,后续的研究中应结合物候观测和归一化植被指数(NDVI)等进一步探究流域生长季指标变化。此外,本研究探讨了黄河流域生长季指标与各季温度的关系,城市化进程、土地利用变化及环流因子对生长季的影响有待进一步研究。

4 结 论

(1) 1960—2020年黄河流域GSS显著提前[-2.04 d·(10a)$^{-1}$],GSE呈推迟趋势[0.85 d·(10a)$^{-1}$],GSL显著延长[2.88 d·(10a)$^{-1}$],AT10和DT10显著增加,倾向率分别为70.62 ℃·(10a)$^{-1}$和3.26 d·(10a)$^{-1}$,但区域差异较大,下游GSS开始最早(2月23),上游最晚(3月30),上游GSE结束最早(10月24),下游最晚(11月30),下游GSL最长为334.03 d,上游最短为297.33 d,下游AT10为4619.85 ℃,上游为2472.16 ℃,下游DT10最大为232.88 d,上游最小为156.31 d。年代际变化来看,1990年代以来,黄河流域GSS逐年代提前,GSE推迟,GSL显著延长,AT10和DT10明显上升。

(2) 近61 a黄河流域整体上由东到西,由南向北GSS逐渐推迟,GSE逐渐提前,GSL逐渐缩短,AT10和DT10逐渐减少。黄河流域上、中、下游地区生长季指标变化趋势一致,下游地区变化幅度最大,上游地区次之,中游地区变幅最小。

(3) M-K突变分析表明,近61 a来黄河流域GSS、AT10和DT10于1998年发生突变,突变后GSS提前了9 d、AT10和DT10分别增加了288.92 ℃和13.49 d。GSE不存在明显突变点。GSL于2002年发生突变,突变后GSL延长了11.08 d。Morlet小波分析表明,近61 a来黄河流域生长季指标存在28 a左右的周期变化。

(4) 近61 a来,黄河流域生长季长度延长了17.6 d,GSS贡献了生长季延长的70.5%,GSE贡献了29.5%。相关分析表明,黄河流域GSS提前主要与春季升温有关,GSE延迟主要源于秋季增温,上游和下游地区GSL延长主要源于春季增温,中游地区GSL延长主要与秋季变暖有关。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis[R]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2021.

[2] Linderholm H W. Growing season changes in the last century[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 137(1-2): 1-14.

[3] 杨丹, 王晓峰. 黄土高原气候和人类活动对植被NPP变化的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 161-179. [Yang Dan, Wang Xiaofeng. Contribution of climatic change and human activities to changes in net primary productivity in the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 161-179.]

[4] Asseng S, Ewert F, Martre P, et al. Rising temperatures reduce global wheat production[J]. Nature Climate Change, 2015, 5(2): 143-147.

[5] Carter T R. Changes in the thermal growing season in Nordic countries during the past century and prospects for the future[J]. Agricultural and Food Science, 1998, 7(2): 161-179.

[6] Piao S L, Friedlingstein P, Ciais P, et al. Growing season extension and its effects on terrestrial carbon flux over the last two decades [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2007, 21(3): GB3018.

[7] Allen M J, Sheridan S C. Evaluating changes in season length, on-

set, and end dates across the United States (1948−2012)[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(3): 1268−1277.

[8] Robeson S M. Increasing growing-season length in Illinois during the 20th century[J]. Climatic Change, 2002, 52(1−2): 219−238.

[9] 王连喜, 陈怀亮, 李琪, 等. 植物物候与气候研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(2): 447−454. [Wang Lianxi, Chen Huailiang, Li Qi, et al. Research advances in plant phenology and climate[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(2): 447−454.]

[10] 刘玉洁, 葛全胜, 戴君虎. 全球变化下作物物候研究进展[J]. 地理学报, 2020, 75(1): 14−24. [Liu Yujie, Ge Quansheng, Dai Junhu, et al. Research progress in crop phenology under global climate change[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(1): 14−24.]

[11] Ho C H, Lee E J, Lee I, et al. Earlier spring in Seoul, Korea[J]. International Journal of Climatology, 2006, 26(14): 2117−2127.

[12] 陶泽兴, 葛全胜, 王焕炯. 1963—2018年中国垂柳和榆树开花始期积温需求的时空变化[J]. 地理学报, 2020, 75(7): 1451−1464. [Tao Zexing, Ge Quansheng, Wang Huanjiong. Spatio-temporal variations in the thermal requirement of the first flowering dates of *Salix babylonica* and *Ulmus pumila* in China during 1963−2018[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(7): 1451−1464.]

[13] Barichivich J, Briffa K R, Myneni R B, et al. Large-scale variations in the vegetation growing season and annual cycle of atmospheric CO_2 at high northern latitudes from 1950 to 2011[J]. Global Change Biology, 2013, 19(10): 3167−3183.

[14] McCabe G J, Betancourt J L, Feng S. Variability in the start, end, and length of frost-free periods across the conterminous United States during the past century[J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(15): 4673−4680.

[15] Cui L L, Shi J, Ma Y, et al. Distribution and trend in the thermal growing season in China during 1961−2015[J]. Physical Geography, 2017, 38(6): 1−18.

[16] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe[J]. Nature, 1999, 397(6721): 659.

[17] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991[J]. Nature, 1997, 386(6626): 698−702.

[18] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation[J]. Global Change Biology, 2006, 12(4): 672−685.

[19] 郭灵辉, 吴绍洪, 赵东升, 等. 近50年内蒙古地区生长季变化趋势[J]. 地理科学, 2013, 33(4): 505−512. [Guo Linghui, Wu Shaohong, Zhao Dongsheng, et al. Change trends of growing season over Inner Mongolia in the past 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(4): 505−512.]

[20] 董满宇, 李洁敏, 王磊鑫, 等. 1960—2017年华北地区气候生长季变化特征及成因分析[J]. 地理科学, 2019, 39(12): 1990−2000. [Dong Manyu, Li Jiemin, Wang Leixin, et al. Climatic characteristics of climatic growing season and impact factors in north China during 1960−2017[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(12): 1990−2000.]

[21] Dong M Y, Jiang Y, Zheng C T, et al. Trends in the thermal growing season throughout the Tibetan Plateau during 1960−2009[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 166−167: 201−206.

[22] 王苗苗, 周蕾, 王绍强, 等. 东北地区生长季长度变化及其对总初级生产力的影响分析[J]. 地理科学, 2018, 38(2): 284−292. [Wang Miaomiao, Zhou Lei, Wang Shaoqiang, et al. Change of growing season length and its effects on gross primary productivity in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(2): 284−292.]

[23] 徐铭志, 任国玉. 近40年中国气候生长期的变化[J]. 应用气象学报, 2004, 15(3): 306−312. [Xu Mingzhi, Ren Guoyu. Change in growing season over China: 1961−2000[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2004, 15(3): 306−312.]

[24] Xia J J, Yan Z W, Wu P L. Multidecadal variability in local growing season during 1901−2009[J]. Climate Dynamics, 2013, 41(2): 295−305.

[25] 吴蓓蕾, 姜大膀, 王晓欣. 1961—2018年中国生长季变化[J]. 大气科学, 2021, 45(2): 424−434. [Wu Beilei, Jiang Dabang, Wang Xiaoxin. Changes in the growing season across China during 1961−2018[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(2): 424−434.]

[26] Jiang F Q, Hu R J, Zhang Y W, et al. Variations and trendonset, cessation and length of climatic growing season over Xinjiang, NW China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2011, 106(3−4): 449−458.

[27] Wu C Y, Wang J, Ciais P, et al. Widespread decline in winds delayed autumn foliar senescence over high latitudes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021, 118(16): e2015821118.

[28] 陈晓艺, 曹雯, 王晓东, 等. 淮河流域南部作物生长季农业气候资源特征分析[J]. 生态环境学报, 2018, 27(6): 1005−1015. [Chen Xiaoyi, Cao Wen, Wang Xiaodong, et al. Analysis of agroclimatic resource characteristics of main crops growing season in the south of Huaihe River Basin[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(6): 1005−1015.]

[29] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century[J]. Climate Research, 2002, 19(3): 193−212.

[30] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999. [Wei Fengying. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999.]

[31] 苗运玲, 于永波, 霍达, 等. 中天山北坡冬季降雪变化及其影响因子分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(1): 9−18. [Miao Yunling, Yu Yongbo, Huo Da, et al. Analysis of winter snowfall variability and its influencing factors on the north slopes of the middle Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(1): 9−18.]

[32] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61−78.

[33] 任国玉, 徐铭志, 初子莹, 等. 近54年中国地面气温变化[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 717-727. [Ren Guoyu, Xu Mingzhi, Chu Ziying, et al. Changes of surface air temperature in China during 1951-2004[J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(4): 717-727.]

[34] Reid P C, Hari R E, Beaugrand G, et al. Global impacts of the 1980s regime shift[J]. Global Change Biology, 2016, 22(2): 682-689.

Spatial-temporal evolution and impact factors during the climatic growing season in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

ZHANG Zhigao[1], SUN Zixin[2], ZHANG Xiuli[3], GUO Kexin[4], LI Zhuoya[1], HAO Haijiao[1], CAI Maotang[5]

(1. School of Resources Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang 455000, Henan, China; 2. School of Geography and Environment, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China; 3. Yellow River Civilization and Sustainable Development Research Center, Henan University, Kaifeng 475001, Henan, China; 4. College of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China; 5. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Data from 89 meteorological stations in the Yellow River Basin from 1960 to 2020 was used in this investigation. The Mann-Kendall mutation test as well as Morlet wavelet and correlation analyses were conducted to assess the spatial and temporal change characteristics and influencing factors at the beginning of the growing season (GSS), the end of the growing season (GSE), and the length of the growing season (GSL), as well as days with an active accumulated temperature of ≥10 ℃ (AT10) and active accumulated temperature of ≥10 ℃ (DT10) during the growing season. From 1960 to 2020 the GSS significantly advanced at a rate of $-2.04\ d\cdot(10a)^{-1}$, while the GSE showed a delayed trend with a change rate of $0.85\ d\cdot(10a)^{-1}$, and the GSL was significantly prolonged at a rate of $2.88\ d\cdot(10a)^{-1}$; there were also significant regional differences. The GSS in the lower reaches of the Yellow River Basin was the earliest (February 23), while that in the upper reaches was the latest (March 30). Furthermore, the GSE in the upper reaches ended early (October 24), while that in the lower reaches was the latest (November 30), and the GSL in lower reaches was the longest (334.03 d), while that in the upper reaches was the shortest (297.33 d). The significant extension of GSL was mainly due to the significant advance of GSS. Over the past 61 years, the growth season indices were found to have a main period of approximately 28 a in the Yellow River Basin. GSS, AT10, and DT10 mutated in 1998, and GSL mutated in 2002. The changing trends for the growth season indices in the upper, middle, and lower reaches of the Yellow River Basin were consistent, with the largest change occurring in the lower reaches, followed by the upper and middle reaches, respectively. Correlation analyses showed that GSS advances in the Yellow River Basin were mainly related to spring warming over the past 61 years, and the delay of GSE was mainly due to autumn warming, the extension of GSL in the upstream and downstream areas was mainly due to spring warming, and the extension of GSL into the middle reaches was mainly related to autumn warming.

Keywords: growing season; spatial-temporal variations; trend; seasonal temperature; the Yellow River Basin